

УДК 519.24:62-50

**М. Кошовий, докт. техн. наук, проф.;**  
**В. Заболотний, канд. техн. наук, доц.;**  
**О. Костенко, канд. техн. наук, доц.; О. Сухобрус**

*Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»*

## **ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ЗВАРЮВАННЯ ПЛАСТИН МАЛОЇ ТОВЩИНИ**

**Резюме.** Початкову матрицю планування експерименту оптимізовано за вартістю реалізації за допомогою програмного забезпечення. Отримано математичну модель процесу зварювання пластин. Визначено оптимальний режим проведення точкового зварювання пластин зі сталі електротехнічної малої товщини.

**Ключові слова:** точкове зварювання, математична модель, план експерименту.

**N. Koshevoy, V. Zabolotny, E. Kostenko, E. Sukhobrus**

## **WELDING OPTIMIZATION OF THIN METAL**

**Summary.** Optimization of metal plates welding with small thickness was held using the methods of planning the experiment.

The initial design of experiment matrix is optimized for the implementation cost using the search program of optimal combinatorial multilevel multifactor experiment plans. At the core of the program is the generation of combinatorial multifactor experiment plans, evaluation of their characteristics, the selection of the optimal implementation cost variant.

Using the program the prize of the implementation cost of the experiment plan in 1,93 times as compared with the initial plan and in 3,00 times as compared with the plan that has a maximum value, is achieved.

According to the obtained optimized plan a full factorial experiment was conducted. For each experiment matrix duplicate experiment was carried out to reduce random errors. As the factors that influence the value of capacitor, the rate of transformation, the pressure on the electrodes were considered. As the parameter of optimization the efforts gap of welded plates on tensile machine was elected. The mathematical model of plates welding is obtained. The adequacy of the obtained mathematical model is confirmed by the Fisher's exact test.

Checking of the regression coefficients significance was performed using the Student's criterion. The coefficients of all the factors considered were significant.

According to the mathematical models, a substantial change in the parameter optimization is caused by a change in value of capacitor, because it has the largest coefficient in absolute value. To increase the welded plates break efforts it is necessary to increase the value of capacitor and to reduce the rate of transformation and pressure on the electrodes.

The search of the optimal parameters of welding process was carried out using a gradient method. The movement of the gradient is carried out by adding to the basic level of pitch variation for each factor. The calculation step is carried out by multiplying the coefficients of variation of the mathematical model for the interval of variation for each factor. The gradient motion series of experiments are obtained. The experiences that matter the most parameter optimization have been realized in practice. Obtained in practice parameter of optimization is close to the calculated using the mathematical model.

The optimal mode of spot resistance welding of thin electrical steel plates is defined. To achieve the maximum strength spot welding of thin electrical steel plates it is recommended to set the following parameters: the value of capacitor – 140 uF, the coefficient of transformation – 75, the pressure on the electrodes – 10 N.

**Key words:** spot welding, mathematical model, plan of experiment.

**Постановка проблеми.** Точкове зварювання є найпоширенішим способом зварювання. На його частку припадає близько вісімдесяти відсотків усіх з'єднань, які виконуються контактним зварюванням. Актуальною є проблема підвищення ефективності дослідження процесу зварювання, спрямованого на отримання адекватної математичної моделі процесу при мінімальних часових і вартісних витратах. Надалі математична модель використовується для пошуку оптимального режиму зварювання, який забезпечує найбільшу міцність.

Для вирішення цієї проблеми доцільно застосовувати методи планування експерименту, перевагами яких є їх універсальність і придатність для дослідження різноманітних технологічних процесів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відома програма пошуку оптимальних комбінаторних багаторівневих планів багатофакторного експерименту [1] призначена для автоматизації процесу пошуку. В основі роботи програми лежить генерація комбінаторних планів багатофакторного експерименту, оцінювання їх характеристик, відбір оптимального за вартістю реалізації варіанта.

Невідомий приклад застосування даної програми для оптимізації процесу зварювання металевих пластин малої товщини.

**Мета роботи.** Дослідити процес точкового зварювання пластин зі сталі електротехнічної малої товщини з використанням зварювальної машини. Для цього з застосуванням програми визначити оптимальний за вартістю реалізації план експерименту процесу зварювання, побудувати математичну модель процесу, за допомогою якої визначити оптимальний режим зварювання.

**Постановка задачі.** Зварювання пластин проводиться на зварювальній машині ТКМ-4. Напруга зарядки конденсаторів становить 500 В. Діаметр електродів 2 мм. Товщина зварюваних пластин електротехнічної сталі становить 0,1 мм.

Необхідно визначити, за яких умов міцнісні характеристики зварених пластин будуть оптимальними. Для цього необхідно провести оптимізацію початкового плану за критерієм сумарної вартості реалізації експерименту, побудувати математичну модель процесу зварювання, за допомогою якої визначити оптимальні параметри проведення зварювання пластин.

**Результати дослідження.** Проведено експеримент з визначення оптимального режиму точкового зварювання пластин малої товщини. Досліджувалось точкове зварювання пластин сталі електротехнічної малої товщини за допомогою зварювальної машини ТКМ-4 [2]. У якості факторів, що впливають, розглядалися ємність конденсаторів, коефіцієнт трансформації, зусилля стиску на електродах. В якості параметра оптимізації було обрано зусилля розриву зварених пластин на розривній машині РМУ-0,05-1. Функція відгуку процесу зварювання виглядає так:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3), \quad (1)$$

де  $Y$  – зусилля розриву зварених пластин, Н;

$X_1$  – ємність конденсаторів, мкФ;

$X_2$  – коефіцієнт трансформації;

$X_3$  – зусилля стиску на електродах, Н.

Для зазначеного процесу проведено повний факторний експеримент типу  $2^k$ , де  $k=3$ . Натуральні значення факторів та відповідні їм кодовані значення представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Натуральні та кодовані значення факторів

| Рівні факторів | Фактори                    |                          |                                 |
|----------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------------|
|                | $X_1$                      | $X_2$                    | $X_3$                           |
|                | Ємність конденсаторів, мкФ | Коефіцієнт трансформації | Зусилля стиску на електродах, Н |
| -1             | 30                         | 75                       | 20                              |
| +1             | 120                        | 150                      | 80                              |

Вартості змін значень рівнів факторів наведено в таблиці 2.

Початкова матриця планування, що наведена в таблиці 3, була оптимізована за вартістю реалізації з використанням програмного забезпечення [1].

Таблиця 2

Вартості змін значень рівнів факторів

| Вартості змін, ум.од. | Фактори |       |       |
|-----------------------|---------|-------|-------|
|                       | $X_1$   | $X_2$ | $X_3$ |
| з «-1» в «+1»         | 2,5     | 2,0   | 1,5   |
| з «+1» в «-1»         | 3,0     | 2,5   | 2,0   |

Порядок проведення оптимального за вартістю реалізації плану експерименту представлено в таблиці 3.

Таблиця 3

Початковий та оптимальний за вартістю реалізації плани експерименту

| Початковий план |         |       |       | Оптимальний план |         |       |       |
|-----------------|---------|-------|-------|------------------|---------|-------|-------|
| Номер досліджу  | Фактори |       |       | Номер досліджу   | Фактори |       |       |
|                 | $X_1$   | $X_2$ | $X_3$ |                  | $X_1$   | $X_2$ | $X_3$ |
| 1               | -1      | -1    | -1    | 7                | -1      | +1    | +1    |
| 2               | +1      | -1    | -1    | 3                | -1      | +1    | -1    |
| 3               | -1      | +1    | -1    | 1                | -1      | -1    | -1    |
| 4               | +1      | +1    | -1    | 5                | -1      | -1    | +1    |
| 5               | -1      | -1    | +1    | 6                | +1      | -1    | +1    |
| 6               | +1      | -1    | +1    | 2                | +1      | -1    | -1    |
| 7               | -1      | +1    | +1    | 4                | +1      | +1    | -1    |
| 8               | +1      | +1    | +1    | 8                | +1      | +1    | +1    |

Вартість реалізації експерименту за оптимальним планом становить 14 ум.од., тоді як вартість реалізації початкової матриці – 27 ум.од., а максимальна вартість дорівнює 42 ум.од. Таким чином, досягнуто виграв за вартістю реалізації в 1,93 раза в порівнянні з початковим планом експерименту і в 3,00 раза в порівнянні з планом, що має максимальну вартість.

За отриманим оптимізованим планом проведено повний факторний експеримент. Для кожного досліджу матриці ставився дублюючий дослід з метою зниження випадкової помилки. Отримані числові значення параметра оптимізації для дубльованих дослідів наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

Отримані на досліді значення параметра оптимізації

| Номер досліді | Фактори |       |       | Параметр оптимізації |       |
|---------------|---------|-------|-------|----------------------|-------|
|               | $X_1$   | $X_2$ | $X_3$ | $Y_1$                | $Y_2$ |
| 7             | -1      | +1    | +1    | 9,5                  | 9,1   |
| 3             | -1      | +1    | -1    | 15,5                 | 16,3  |
| 1             | -1      | -1    | -1    | 16,4                 | 16,2  |
| 5             | -1      | -1    | +1    | 15,1                 | 14,7  |
| 6             | +1      | -1    | +1    | 17,5                 | 16,9  |
| 2             | +1      | -1    | -1    | 18,0                 | 18,9  |
| 4             | +1      | +1    | -1    | 18,0                 | 18,1  |
| 8             | +1      | +1    | +1    | 15,4                 | 15,0  |

Для проведеного експерименту отримано математичну модель процесу

$$Y = 15,66 + 1,56 \cdot X_1 - 1,05 \cdot X_2 - 1,51 \cdot X_3 + 0,45 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,49 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,85 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,45 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (2)$$

Адекватність отриманої математичної моделі перевірялася за допомогою критерію Фішера [3]

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{\{Y\}}^2}, \quad (3)$$

де  $S_{ad}^2$  – дисперсія адекватності;  $S_{\{Y\}}^2$  – дисперсія відтворюваності.

Дисперсія адекватності для отриманої математичної моделі

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - Y_{i\text{теор.}})^2}{f} = 0,00, \quad (4)$$

де  $\bar{Y}_i$  – середнє значення відгуку за дослідіми і-ої серії;  $Y_{i\text{теор.}}$  – значення відгуку за дослідіми і-ої серії, передбачене математичною моделлю;  $N$  – кількість дослідів;  $f$  – кількість ступенів свободи, що дорівнює 4.

Дисперсію відтворюваності визначали таким чином:

$$S_{\{Y\}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{N(n-1)} = 0,15, \quad (5)$$

де  $n$  – кількість дублюючих дослідів;  $Y_{ij}$  – значення відгуку і-го досліді.

Розрахункове значення критерію Фішера дорівнює 0,00. Табличне значення критерію Фішера для даної кількості ступенів свободи дорівнює 3,80. Оскільки

розрахункове значення критерію не перевищує табличного, гіпотеза адекватності математичної моделі підтверджується.

Перевірка значущості коефіцієнтів регресії проводилася за допомогою критерію Стюдента [4]. При проведенні повного факторного експерименту довірчі інтервали для всіх коефіцієнтів дорівнюють один одному. Довірчий інтервал  $\Delta b_j$  визначається за формулою

$$\Delta b_j = \pm t S_{\{b_j\}}, \quad (6)$$

де  $t$  – табличне значення критерію Стюдента, яке при рівні значущості 0,05 для восьми ступенів свободи дорівнює 2,306;  $S_{\{b_j\}}$  – квадратична помилка коефіцієнта регресії, що визначається так:

$$S_{\{b_j\}} = \sqrt{\frac{S_{\{Y\}}^2}{N}} = 0,1353. \quad (7)$$

Таким чином, довірчий інтервал складає  $\pm 0,3118$ . Абсолютні величини коефіцієнтів регресії й ефектів взаємодії більше довірчого інтервалу, гіпотеза про значущість коефіцієнтів регресії приймається.

Оскільки модель адекватна, справедлива наступна її інтерпретація. Коефіцієнти всіх розглянутих факторів є значущими. Більш істотній зміні параметра оптимізації сприяє фактор  $X_1$ , оскільки він має найбільший за абсолютною величиною коефіцієнт. Для збільшення значення параметра оптимізації (підвищення міцнісних характеристик зварених пластин) сприятливо збільшення фактора  $X_1$ , тому що його коефіцієнт має знак плюс, і навпаки, несприятливо збільшення факторів  $X_2$  та  $X_3$ , які мають коефіцієнти зі знаком мінус.

Пошук оптимальних параметрів процесу зварювання проведено з використанням градієнтного методу [5]. Рух по градієнту здійснюється додаванням до основного рівня кроку варіювання для кожного фактора. Розрахунок кроку варіювання проводиться множенням коефіцієнтів математичної моделі на інтервал варіювання по кожному фактору. Інтервал варіювання, основний рівень і розрахований крок варіювання наведено в таблиці 5.

Таблиця 5

Інтервал варіювання, основний рівень і крок варіювання

| Параметри варіювання | Фактори                    |                          |                                 |
|----------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------------|
|                      | $X_1$                      | $X_2$                    | $X_3$                           |
|                      | Ємність конденсаторів, мкФ | Коефіцієнт трансформації | Зусилля стиску на електродах, Н |
| Основний рівень      | 75                         | 112,5                    | 50                              |
| Інтервал варіювання  | 45                         | 37,5                     | 30                              |
| Крок варіювання      | 70                         | -40                      | -45                             |

Отримана серія дослідів руху по градієнту наведена в таблиці 6.

Таблиця 6

Серія дослідів руху по градієнту

| Номер дослідів | Значення факторів |          |                |          |                |          | Y     |
|----------------|-------------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|-------|
|                | X <sub>1</sub>    |          | X <sub>2</sub> |          | X <sub>3</sub> |          |       |
|                | Натуральні        | Кодовані | Натуральні     | Кодовані | Натуральні     | Кодовані |       |
| 9              | 145               | 1,56     | 72,5           | -1,07    | 5              | -1,05    | 19,35 |
| 10             | 85                | 0,22     | 107,5          | -0,13    | 44             | -0,2     | 16,39 |
| 11             | 95                | 0,44     | 102,5          | -0,27    | 38             | -0,40    | 17,03 |
| 12             | 105               | 0,67     | 97,5           | -0,40    | 32             | -0,60    | 17,58 |
| 13             | 115               | 0,89     | 92,5           | -0,53    | 26             | -0,80    | 18,07 |
| 14             | 125               | 1,11     | 87,5           | -0,67    | 20             | -1,00    | 18,50 |
| 15             | 135               | 1,33     | 82,5           | -0,80    | 14             | -1,20    | 18,90 |
| 16             | 145               | 1,55     | 77,5           | -0,93    | 8              | -1,40    | 19,28 |
| 17             | 155               | 1,78     | 72,5           | -1,07    | 2              | -1,60    | 19,65 |

Для оцінювання параметра оптимізації використовувалася математична модель процесу. Оскільки в математичній моделі застосовуються кодовані значення факторів, то в кожному досліді проводився переклад натуральних значень факторів у кодовані.

При отриманому кроці можливо реалізувати тільки 9 дослідів, подальший рух призводить до значень факторів, які не мають фізичного змісту. Тому крок був пропорційно зменшений і дорівнює 10; -5; -6 для факторів X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> та X<sub>3</sub> відповідно. Рух по градієнту у досліді 10 розпочато з основного рівня.

Дослід 16 було реалізовано на практиці, для зменшення випадкової помилки він також дублювався. Значення факторів були заокруглені через обмеження кроку зміни ємності конденсаторів, коефіцієнта трансформації і навантаження на електродах на зварювальній машині ТКМ-4. Натуральні значення факторів 16 дослідів та параметра оптимізації наведено в таблиці 7.

Таблиця 7

Параметри реалізованого на практиці дослідів

| Номер дослідів | Фактори        |                |                | Параметр оптимізації |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|----------------|
|                | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | Y <sub>1</sub>       | Y <sub>2</sub> |
| 16             | 140            | 75             | 10             | 22,0                 | 19,4           |

Середнє значення зусилля розриву зварених пластин для 16 дослідів складає 20,70 Н. Передбачене математичною моделлю зусилля розриву для даного дослідів становить 19,28 Н. Отримане на практиці значення параметра оптимізації близьке до розрахованого за допомогою математичної моделі.

Подальше збільшення значення фактора X<sub>1</sub> призводить до пропалювання зварюваних пластин, що знижує їх міцнісні характеристики.

Для досягнення найбільшої міцності при точковому зварюванні тонких пластин електротехнічної сталі рекомендується встановлювати такі параметри: ємність конденсаторів – 140 мкФ; коефіцієнт трансформації – 75; зусилля стиску на електродах – 10 Н.

**Висновки.** Початкова матриця планування експерименту була оптимізована за вартістю реалізації, що дозволило отримати вигоду за вартістю реалізації плану експерименту в 1,93 рази в порівнянні з початковим планом.

Побудовано математичну модель процесу зварювання, згідно з якою для збільшення зусилля розриву зварених пластин потрібно збільшувати ємність конденсаторів та зменшувати коефіцієнт трансформації й зусилля стиску на

електродах. Визначено оптимальний режим проведення точкового зварювання пластин сталі електротехнічної малої товщини за допомогою зварювальної машини ТКМ-4.

**Conclusion.** The initial design of experiment matrix is optimized for the implementation cost that allowed to claim the prize of the implementation cost of the experiment plan in 1,93 times as compared with the initial plan.

According to the mathematical model of the welding process, to increase the gap of welded plates it is necessary to increase capacity and to reduce the rate of transformation and pressure on the electrodes. The optimal mode of spot resistance welding of thin electrical steel plates by welding machine ТКМ-4 is defined.

### **Список використаної літератури**

1. Комп'ютерна програма «Програма пошуку оптимальних багаторівневих комбінаторних планів багатофакторного експерименту» / М.Д. Кошовий, О.М. Костенко, В.А. Дергачов: Свід. про реєстр. автор. права на твір № 31824. – Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін. освіти і науки України; Реєстр. 28.01.2010 р.
2. Технологические процессы сборки и испытаний средств автоматики и измерительной техники: лаб. практикум [Текст] / В.А. Заболотный, П.И. Коваленко, А.В. Заболотный, В.А. Кныш. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2005. – 24 с.
3. Налимов, В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов [Текст] / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
4. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика [Текст] / А.И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.
5. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий (программное введение в планирование эксперимента) [Текст] / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 283 с.

*Отримано 26.11.2012*